

毛竹碳汇林栽植方式在成林初期对空间分布格局变化特征的影响

郑泽睿¹, 施拥军^{1,2}, 周国模^{1,2}, 陈 婷¹, 杨 一¹, 裴晶晶¹

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 毛竹 *Phyllostachys edulis* 林空间结构是毛竹生长过程的重要因子, 是提高竹林质量, 优化经营水平的重要参考依据。利用聚集指数和 Ripley's $K(d)$ 函数, 分析从 2009–2013 年毛竹碳汇林成林初期空间分布格局年际变化特征及匀栽、丛栽栽植方式对分布格局的影响。结果表明: ①在 5 a 造林年限间, 2 种栽植方式下的新竹与活立竹的空间分布格局均呈聚集分布; ②丛栽栽植毛竹林新竹聚集指数变动范围为 0.38~0.76, 活立竹聚集指数变动范围为 0.45~0.60; 匀栽栽植毛竹林新竹聚集指数变动范围为 0.18~0.65, 活立竹聚集指数变动范围为 0.18~0.52; ③聚集指数与活立竹株数间存在较强的相关性, 匀栽毛竹林活立竹株数(x)与聚集指数(y)拟合方程为 $y=0.103\ 7x^{0.419\ 3}$, $R^2=0.937\ 9$; 丛栽毛竹林活立竹株数(x)与聚集指数(y)符合二次方程: $y=0.000\ 04x^2-0.002\ 7x+0.501$, $R^2=0.985\ 6$; ④新造毛竹碳汇林在成林过程中存在不同尺度距离下的团状聚集分布; ⑤栽植方式对立竹株数和分布格局影响明显。图 8 表 1 参 25

关键词: 森林生态学; 新造毛竹林; 碳汇林; 空间分布格局; 聚集指数; Ripley's $K(d)$ 函数

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)03-0395-11

Planting pattern's influence for characteristics of variation of spatial distribution pattern in the early stages of moso bamboo carbon sink stands

ZHENG Zerui¹, SHI Yongjun^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, CHEN Ting¹, YANG Yi¹, PEI Jingjing¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Spatial structure in a moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) stand is an important factor in its growing process. To analyze the influence of interannual variation characteristics of spatial patterns having different planting patterns in the early stage of moso bamboo stands used as carbon sinks, an aggregation index and Ripley's $K(d)$ function were applied from 2009 to 2013, and results were fitted with regression equations. Results showed 1) spatial patterns of new moso bamboo and established moso bamboo with an aggregated distribution pattern after five years of afforestation. 2) The aggregation index in group-planted moso bamboo stands for new moso bamboo was from 0.38 to 0.76 and for established moso bamboo was from 0.45 to 0.60; for uniformly planted moso bamboo stands, the aggregation index for new moso bamboo was from 0.18 to 0.65, and the established moso bamboo stand was from 0.18 to 0.52. 3) A strong relationship was found between the aggregation

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2016-04-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0503); 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2013-4-71); 国家自然科学基金资助项目(31370637); 浙江省自然科学基金资助项目(Y5110145)

作者简介: 郑泽睿, 从事森林碳汇计量与监测研究。E-mail: 389113480@qq.com。通信作者: 施拥军, 副教授, 从事森林碳汇计量与监测研究。E-mail: syjwwh@163.com

index of an established stand of moso bamboo (y) and culm number (x). For a uniformly planted moso bamboo stand, the fitted regression equation was $y = 0.103 7x^{0.419 3}$, $R^2 = 0.937 9$; and for group-planted moso bamboo stands it was $y = 0.000 04x^2 - 0.002 7x + 0.501$, $R^2 = 0.985 6$. 4) In the process of forest establishment, new moso bamboo carbon sink stands existed as an agglomerate distribution for different distance scales. 5) Thus, the cultivation mode influenced the moso bamboo stand's culm number and spatial distribution pattern. [Ch, 8 fig. 1 tab. 25 ref.]

Key words: forest ecology; new moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest; carbon sequestration forest; spatial distribution pattern; aggregation index; Ripley's $K(d)$ function

全球气候变暖已成为国际社会关注的焦点,而大量二氧化碳等温室气体排放形成的温室效应则是气候变暖的根源。森林是陆地上最大的生态系统,也是陆地生态系统的最大碳库,森林生态系统维持的碳库占全球总碳库的46.30%。森林碳汇功能具有比其他减排方式更经济和高效的优点,《京都议定书》中明确森林碳汇是二氧化碳减排的主要替代方式^[1-3]。碳汇造林不仅可以增加陆地碳汇,而且能减缓大气中二氧化碳的积累,具有重要的政治意义和科学实践意义^[4]。竹林是地球陆地上重要的森林植被类型,也是特殊的生态系统单元。中国地处世界竹子分布的中心区,是世界第一大产竹国,有竹子39个属500余种,竹林面积占森林面积的3.06%^[5]。竹林为异龄林,与其他林分相比,具有生长速度快、高产和用途广泛等优点,竹笋出土后在较短的时间内(40 d左右)完成高生长,1年生毛竹 *Phyllostachys edulis* 的碳储量在6个月时间内已占全年碳储量的88.80%以上,毛竹具有很强的固碳能力,是速生阶段杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林的1.33倍、热带山地雨林的1.33倍、27年生杉木林的2.16倍^[3]。新造毛竹林林分状态分为成林前和成林后2个阶段。成林后的毛竹林林分结构稳定,包括立竹密度、胸径、竹高和生物量等。许多学者利用地面调查和遥感监测等方式对成林后毛竹林分生物量、固碳能力进行了深入的研究^[6-9],关于毛竹林林分结构与地形环境、经营方式的关系研究也有较多报道。有研究认为:人工栽植毛竹林成林稳定后在异质性环境中的分布更偏向泊松分布^[10],而在近自然状态下毛竹林空间分布格局随年份发生动态变化^[11]。还有研究发现:通过改善经营措施对于优化毛竹林径级结构、年龄结构和空间结构从而提高单位面积生产力有重要作用^[12-14]。与成林后毛竹林研究相比,学者对成林前毛竹林的相关研究较少,同时一些关于新造毛竹林成林前的研究也主要聚焦在非空间结构上,陈婷等^[16]研究表明:毛竹林在成林前与成林后非空间结构间差异较大。陈双林等^[15]研究发现:新造毛竹林林分结构状况受到立地类型、母竹质量与初植密度和造林模式等多重影响。毛竹林不同阶段空间分布格局的研究有助于完善对该物种种群水平结构的定量描述^[17],因此,对毛竹林成林前空间结构的研究变得更有意义。为此,本研究以2块不同栽植方式的毛竹碳汇林为对象,对新竹进行了连续监测,探究不同栽植方式对毛竹林自然成林过程中的空间分布格局特征的影响,为毛竹碳汇林营造与管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于浙江省临安市藻溪镇严家村严家山(30°10'29.7"N, 119°29'55.6"E),属中亚热带季风气候,平均海拔为550 m,年平均气温为15.8℃,年平均降水量为1 500.0 mm,年平均无霜期为236.0 d。地形地貌为低山丘陵,土壤为红壤, pH 4.4。森林植被中,乔木层主要有萌蘖次生杉木以及少量的青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 等。

1.2 标准地设置与调查方法

2008年11月,在试验区通过母竹移栽方式新造2块毛竹碳汇林,其中一块采用匀栽方式栽植,栽植面积为15.47 hm²;另一块采用丛栽方式栽植,栽植面积为20.99 hm²。母竹选用标准:年龄为1~2年生,胸径3~6 cm,竹高3.0~3.5 m,鞭色鲜黄,鞭芽饱满,鞭根健全,竹节正常,无病虫害。匀栽方式毛竹林地栽植穴规格为1.2 m(长)×0.6 m(宽)×0.5 m(深),植竹600株·hm⁻²,株行距为4 m×4 m;丛栽方式栽植穴为1.2 m(长)×0.5 m(宽)×0.5 m(深),采用品字形设计,栽植穴3个·栽植点⁻¹,植竹675株·hm⁻²。在毛竹林幼林阶段,每年春季和初夏各中耕除草1次,造林后3 a内采用穴施法施用尿素300~

450 kg·hm⁻²·a⁻¹, 除挖去退笋、败笋外, 全部留笋长竹, 不进行伐竹作业。在匀栽与丛栽 2 种不同栽植方式毛竹碳汇林中各随机布设 20 块 20 m × 20 m 固定标准地。

2009–2013 年, 每年对试验固定标准地内的新竹进行定位监测。用 NTS-352 全站仪(测距精度: 3 mm+2×10⁻⁶ mm; 测角精度 2 s)测定每株新竹的基部三维坐标(X, Y, H)和竹高 h , 其中 X 和 Y 是平面直角坐标, H 是海拔高度, h 是竹子基部到竹梢顶部的垂直高度, 并利用围尺测量新竹的胸径。

1.3 数据分析方法

1.3.1 聚集指数 聚集指数是最近邻单株距离的平均值与随机分布下的期望平均距离之比, 经 Donnelly 优化^[18], 公式为:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{N}} + \frac{0.0514F}{N} + \frac{0.041F}{N^{\frac{3}{2}}}} \quad (1)$$

式(1)中: R 为聚集指数; r_i 为第 i 株毛竹到最近邻竹的距离(m); N 为固定标准地内毛竹株数(株); F 为固定标准地面积(m²); P 为固定标准地周长(m)。

1.3.2 Ripley's $K(d)$ 函数 考虑边缘影响校正后的 Ripley's $K(d)$ 函数公式为:

$$\hat{K}(d) = A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{w_{ij}(d)}{N^2} (i \neq j) \quad (2)$$

式(2)中: N 为固定标准地毛竹株数(株); d 为距离尺度; w_{ij} 为以毛竹 i 为圆心; d 为半径的圆在样地中的周长部分与圆周长之比的倒数, d_{ij} 为毛竹 i 与 j 之间的距离(m), 且 $d_{ij} \leq d$; A 为固定标准地面积(m²)^[19]。

BESAG 等^[20]提出用 $\hat{L}(d)$ 取代 $\hat{K}(d)$, 并对 $\hat{K}(d)$ 作开平方的线性变换, 以保持方差稳定。在随机分布的假设下, 期望值接近于 0^[21]。 $\hat{L}(d)$ 公式为:

$$\hat{L}(d) = \sqrt{\frac{R(d)}{\pi}} - d \quad (3)$$

本研究中通过比较 $\hat{L}(d)$ 与 d 的关系来分析毛竹林空间分布格局类型。 $\hat{L}(d) < 0$, 表示呈均匀分布; $\hat{L}(d) = 0$, 表示呈随机分布; $\hat{L}(d) > 0$, 表示呈聚集分布。

然后对固定标准地内毛竹实际观测分布 $\hat{L}(d)$ 曲线用蒙特-卡洛检验法进行显著性检验。在某个距离尺度 d 范围内, 比较固定标准地毛竹实际观测分布 $\hat{L}(d)$ 曲线与蒙特-卡洛检验法得出的置信区间所绘制的上下 2 条包迹线来判别毛竹林立竹空间分布格局。实际观测分布 $\hat{L}(d)$ 曲线位于包迹线上测, 竹林呈聚集分布; 实际观测分布 $\hat{L}(d)$ 曲线位于包迹线下测, 竹林呈均匀分布; 实际观测分布 $\hat{L}(d)$ 曲线位于 2 条包迹线中间, 竹林呈随机分布^[19]。本研究蒙特-卡洛检验法模拟次数为 200 次, 最大距离尺度为固定标准地最短边长的一半, 即 10 m^[21]。

1.3.3 $\hat{L}(d)$ 曲线图选择 以匀栽毛竹林 2013 年份新竹为例, 所选择标准地个数为 16 个(表 1), 而 16 个标准地的新竹 $\hat{L}(d)$ 曲线图均有所差异, 故需建立标准选取该年份 16 张新竹 $\hat{L}(d)$ 曲线图中最具代表性的一张作为结果图, 用以说明 2013 年新竹在各距离尺度下的空间分布格局。选取标准如下: ①利用 Ripley's $K(d)$ 函数计算所得图统计该年份新竹在 6 个距离尺度(1, 2, 4, 6, 8, 10 m)上呈聚集分布的图的张数, 并计算所得张数占曲线图总张数(所选标准地个数)的比例, 得到比值。②根据统计学经验, 若比值大于 0.5, 说明新竹在该尺度下呈聚集分布的标准地个数超过所选标准地个数(16 个)的一半, 表示新竹在该尺度上呈聚集分布; 若比值小于 0.5, 表示新竹呈随机分布或均匀分布。由于本研究对象在所有尺度上均未显示有均匀分布趋势, 故当比值小于 0.5 时, 新竹在该尺度呈随机分布。③在所有 $\hat{L}(d)$ 曲线图中选择符合各距离尺度下分布格局的图作为 2013 年新竹 $\hat{L}(d)$ 曲线图。

使用 ForStat 2.1 软件、Matlab 软件和 SPSS 20.0 进行试验数据计算。

2 结果与分析

2.1 聚集指数

由于母竹的栽植方式会对研究带来一定的干扰，所以匀栽与丛栽 2 种栽植方式标准地毛竹株数均不包含母竹株数。从表 1 可以看出：不同栽植方式的毛竹林中相同年份的新竹、活立竹株数和聚集指数都有所差异；相同栽植方式的毛竹林新竹、活立竹的聚集指数随着时间的推移发生动态的变化。

表 1 不同栽植方式的毛竹林不同年份新竹和活立竹聚集指数与株数

Table 1 Different planting patterns and different years of new bamboo's and live bamboo's aggregation index and tree number in moso bamboo forest

年份	栽植方式	标准地个数/个	新竹株数/株	新竹聚集指数	活立竹株数/株	活立竹聚集指数
2009	匀栽	8	5 ± 3 aAB	0.18 ± 0.16 aA	5 ± 3 aA	0.18 ± 0.16 aA
	丛栽	6	4 ± 3 aA	0.49 ± 0.07 bAB	4 ± 3 aA	0.49 ± 0.07 bAB
2010	匀栽	16	10 ± 5 aAC	0.35 ± 0.12 aA	13 ± 7 aB	0.35 ± 0.16 aB
	丛栽	17	25 ± 15 bBC	0.46 ± 0.15 bAB	28 ± 16 bB	0.47 ± 0.13 bA
2011	匀栽	16	13 ± 7 aCD	0.50 ± 0.22 aB	24 ± 13 aC	0.40 ± 0.14 aB
	丛栽	18	13 ± 11 aD	0.38 ± 0.19 aA	30 ± 25 bBC	0.45 ± 0.14 aA
2012	匀栽	18	10 ± 6 aAC	0.65 ± 0.18 aC	33 ± 18 aC	0.42 ± 0.13 aBC
	丛栽	20	20 ± 14 bBD	0.52 ± 0.15 bB	59 ± 32 bC	0.49 ± 0.18 aA
2013	匀栽	16	17 ± 11 aD	0.63 ± 0.21 aBC	50 ± 28 aD	0.52 ± 0.11 aC
	丛栽	20	31 ±14 bC	0.76 ± 0.15 bC	89 ± 45 bD	0.60 ± 0.19 aB

说明：同列不同小写字母仅表示相同年份不同栽植方式间差异显著，同列不同大写字母表示相同栽植方式不同年份间差异显著($P<0.05$)。新竹株数、新竹聚集指数、活立竹株数、活立竹聚集指数为平均值±标准差。

2.1.1 新竹聚集指数 从表1 可知：匀栽栽植方式毛竹林 2009 年至 2013 年的新竹聚集指数总体呈上升趋势，聚集指数均小于 1，呈聚集分布。2009 年新竹聚集指数最低为 0.18，2012 年聚集指数最高为 0.65；新竹数也总体呈上升趋势，2012 年略有下降，2013 年新竹数达到最大值为 17 株。2009 年与 2010 年，新竹聚集指数与株数差异不显著($P>0.05$)，说明造林后前 2 a 新竹分布格局差异不大，新竹发育速度较为缓慢；而 2010–2012 年，聚集指数随着造林年限增加而增加，年份间聚集指数差异显著($P<0.05$)，表明造林后第 2 年开始地下竹鞭逐渐扩展，新竹出笋位置离母竹渐远。2009–2012 年，从新竹株数来看，年份间差异并不明显，直到 2013 年，新竹数才有显著($P<0.05$)提高。研究发现：当新竹株数增加时，聚集指数也相应增大，新竹聚集指数与新竹株数符合幂函数关系式(图 1)，新竹株数(x)为自变量，林分新竹聚集指数为因变量(y)，函数关系式为 $y=0.041\ 6x^{0.999\ 2}$ ， $R^2=0.761\ 6$ 。

丛栽栽植方式毛竹林中，2009–2011 年，聚集指数逐年下降，2011–2013 年逐年上升，2011 年新竹聚集指数最低为 0.38，2013 年新竹聚集指数最高为 0.76。这 5 a 中的新竹聚集指数均小于 1，呈聚集分布。2009 年与 2010 年，丛栽新竹聚集指数年份间差异性与匀栽竹林相同，造林后前 2 a，聚集指数差异不显著。2011–2013 年聚集指数具有显著性差异($P<0.05$)，表明该阶段毛竹林正处于快速发育阶段。2009–2013 年，年份间新竹株数差异显著($P<0.05$)，2009 年新竹株最少为 4 株，2010 年新竹突然呈爆发式增长，达到 25 株，2011 年新竹突然减少至 13 株，然后逐步增加，2013 年新竹数最多为 31 株，表明丛栽毛竹林造林后 5 a 为毛竹林快速发育阶段。同时，丛栽新竹聚集指数与新竹株数符合二次函数关系式(图 1)，新竹株数为自变量(x)，新竹聚集指数为因变量(y)，函数关系式为 $y=0.001\ 1-0.028\ 4x+0.588\ 1$ ， $R^2=0.828\ 8$ 。

由表 1 可见：2009 年 2 种栽植方式新竹株数差异不显著，而 2010 年与 2009 年新竹数差异明显，表明通过母竹移栽方式进行毛竹造林后第 1 年，栽植方式不会影响新竹出土数量，可能的原因是新造竹林第 1 年母竹主要以扩展地下竹鞭为主，竹鞭尚未有出笋能力。造林后第 2 年开始(2010–2013 年)，相同年份匀栽与丛栽新竹聚集指数差异显著($P<0.05$)(除 2012 年)，丛栽新竹株数显著($P<0.05$)高于匀栽(除 2012 年)。表明栽植方式对新竹的发育与分布格局的影响逐渐增大。

2.1.2 活立竹聚集指数 匀栽新造毛竹碳汇林造林第 2 年后，各年份间活立竹聚集指数差异不显著，聚

集指数随着造林年限的增加呈缓慢上升趋势。2009–2013 年，各年份间活立竹株数差异性显著 ($P < 0.05$)。截至 2013 年，虽然每年活立竹株数都在增加，但是毛竹林空间分布格局仍然呈聚集分布，表明活立竹分布位置主要以靠近母竹为主，毛竹林还未成林，仍然处于发育阶段。活立竹聚集指数变动范围为 0.18~0.52，林分活立竹株数的波动范围为 5~50 株。匀栽毛竹林聚集指数与活立竹株数关系见图 2。图 2 中，活立竹株数为自变量(x)，林分活竹聚集指数为因变量(y)，拟合方程为 $y=0.103\ 7x^{0.419\ 3}$, $R^2=0.937\ 9$ 。

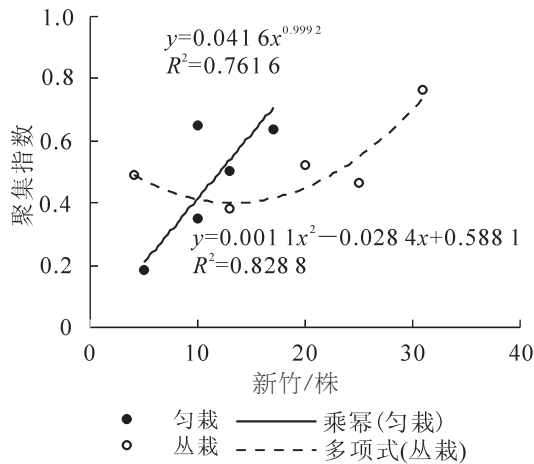


图 1 匀栽与丛栽毛竹林新竹聚集指数和新竹株数的关系

Figure 1 Relation of aggregation index and number of new bamboo in uniform planting and group-planting moso bamboo forest

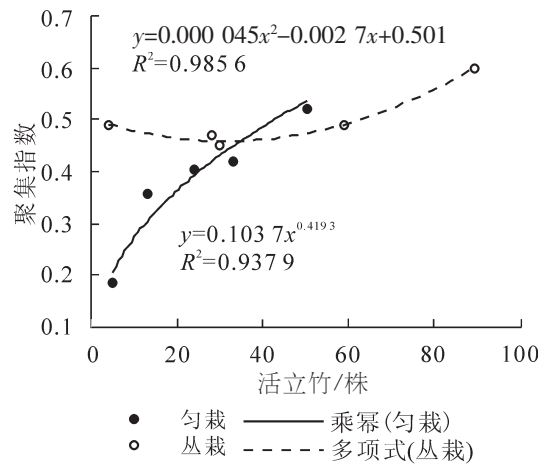


图 2 匀栽与丛栽毛竹林聚集指数与活立竹株数的关系

Figure 2 Relation of aggregation index and number of stand live bamboo in uniform planting and group-planting moso bamboo forest

丛栽栽植方式毛竹林中，2009–2011 年活立竹聚集指数逐年下降，2011 年聚集指数最低为 0.45，随后聚集指数逐年递增，2013 年聚集指数最大为 0.60，该毛竹林分布格局仍呈聚集分布。丛栽毛竹林活立竹株数与聚集指数年份间差异均不显著，与匀栽竹林相同。可见，毛竹造林后 5 a 内，丛栽竹林也处于成林初期阶段。活立竹聚集指数变动范围为 0.45~0.60，活立竹株数变动范围为 4~89 株。由图 2 可见：活立竹聚集指数(y)和株数(x)的函数关系式满足 $y=0.000\ 04x^2-0.002\ 7x+0.501$, $R^2=0.985\ 6$ 。

2009–2013 年 5 a 造林年限中，对比 2 种栽植方式新造毛竹林可以发现，造林后前 2 a，丛栽活立竹聚集指数显著 ($P < 0.05$) 高于匀栽，第 3 年 (2011 年) 开始无显著差异。而在活立竹株数方面，除 2009 年外，丛栽竹林均显著 ($P < 0.05$) 高于匀栽。从林业生产角度出发，相同年份下丛栽聚集指数与活立竹株数均高于匀栽，因此，丛栽栽植方式要优于匀栽栽植方式，并且能够缩短成林所需时间。到目前为止，对比成熟毛竹林分^[22]，2 种栽植方式下的新造毛竹碳汇林仍然处于成林初期阶段。

2.2 Ripley's $K(d)$ 函数

根据 1.3.3 小节介绍，由图 3 中可见：2013 年匀栽毛竹林新竹在 4 m 尺度下呈聚集分布，在 1, 2, 6, 8, 10 m 尺度下呈随机分布，图 4E 为按照 1.3.3 小节标准选择的 2013 年匀栽毛竹林新竹 $\hat{L}(d)$ 曲线图，符合新竹在 4 m 尺度下呈聚集分布，在 1, 2, 6, 8, 10 m 尺度下呈随机分布。以此类推，通过图 3，图 5，图 6 和图 7 所示新竹与活立竹在匀栽与丛栽毛竹林各距离尺度下的分布格局，得到匀栽与丛栽毛竹林各年份新竹、活立竹空间分布格局结果图 (图 4，图 8)。

2.2.1 新竹 Ripley's $K(d)$ 函数 图 4 A~E 分别是匀栽栽植

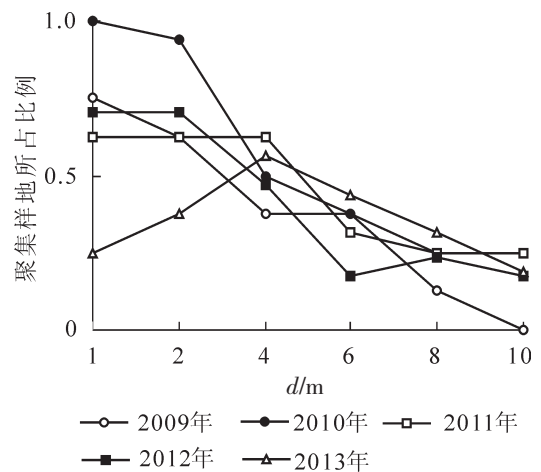
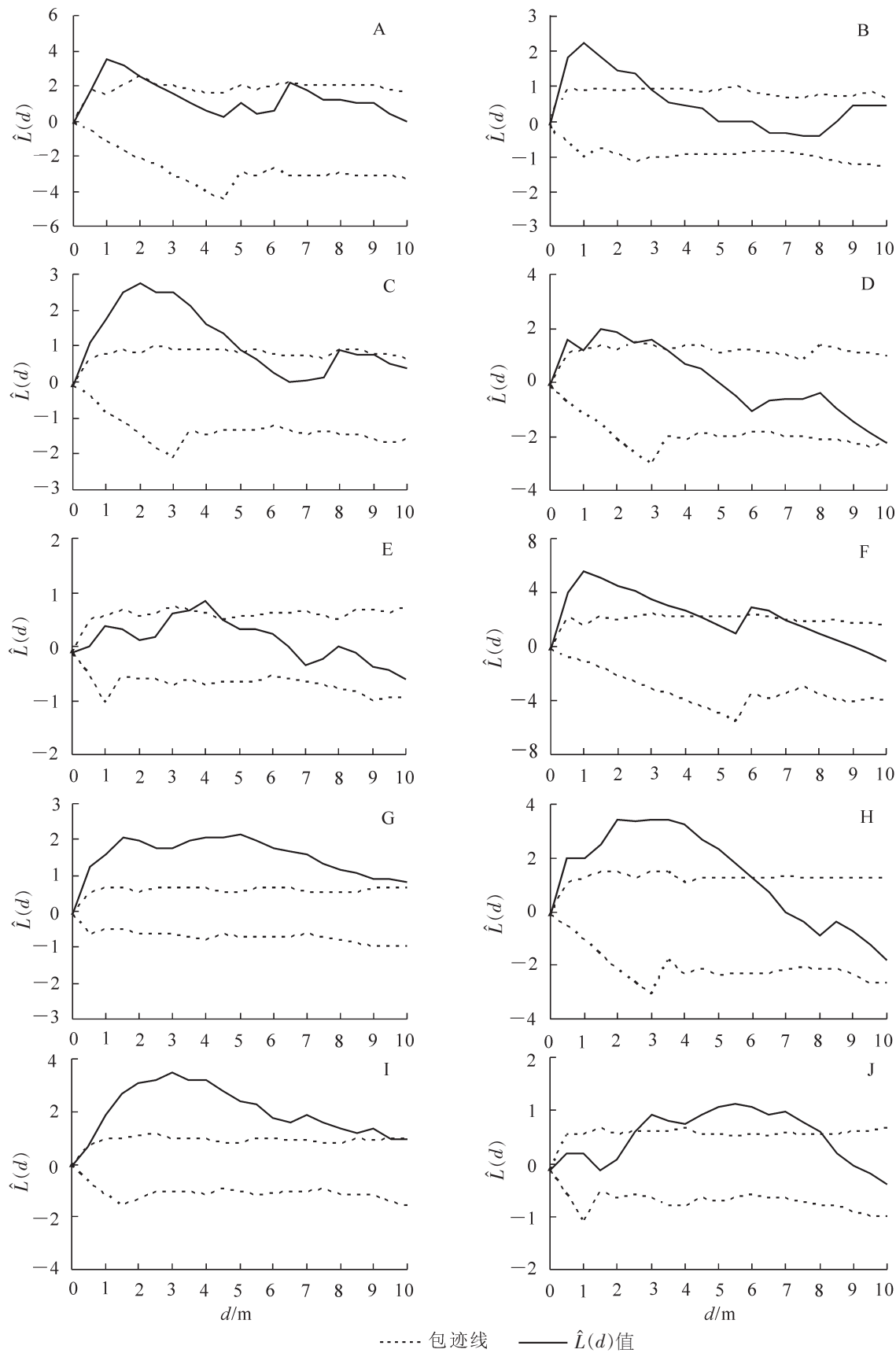


图 3 匀栽毛竹林新竹各距离尺度聚集标准地所占比例

Figure 3 Proportion of aggregated sample plots of new bamboo in all distance dimension in uniform planting moso bamboo forest



A~E. 2009~2013 年匀栽栽植方式；F~J. 2009~2013 年丛栽栽植方式。

图 4 匀栽与丛栽毛竹林各年份新竹空间分布格局

Figure 4 Different years of stand new bamboo's spatial pattern in uniform planting moso bamboo forest and group-planting moso bamboo forest

方式 2009–2013 年新竹空间分布格局图。匀栽的新造毛竹碳汇林 2009 年的新竹在 0~2.2 m 的尺度下,呈聚集分布,在 2.2 m 尺度以上呈随机分布;2010 年新竹在 0~3.3 m 的尺度下呈聚集分布,在 3.3 m 尺度以上呈随机分布;2011 年新竹在 5.4 m 尺度以上呈随机分布。新竹的繁殖离不开母竹竹鞭的扩展,新竹出笋位置离母竹较近,因此新竹小尺度呈聚集分布,大尺度呈随机分布表明造林前几年新竹分布格局受到了母竹栽植方式的影响。随着造林年限的增加,新竹呈随机分布的距离尺度逐渐变远,表明母竹竹鞭的长度逐渐增加,新竹出土位置离母竹渐远。2012–2013 年,新竹逐渐在各距离尺度上呈随机分布表明毛竹林地下鞭根系统逐渐完善。图 4A~E 中的波谷尖峰所在距离表明新竹在该尺度下存在团状分布,波谷增多说明新竹的团状分布个数增多,表明竹林地下鞭根出现交错现象,致使部分不同种源新竹在一定尺度下呈现团状聚集分布。图 4F~J 分别是丛栽栽植方式 2009–2013 年新竹空间分布格局图,丛栽栽植方式 2009 年新竹在距离尺度大于 4.4 m 以上呈随机分布也受到了母竹栽植方式的影响。但 2010 与 2012 年新竹整体分布格局主要呈聚集分布,在 0~3.0 m 距离尺度上新竹聚集趋势明显,但在距离尺度大于 5.0 m 以上,聚集趋势开始减弱。2013 年新竹聚集趋势进一步降低,以随机分布为主要分布格局。

2.2.2 活立竹 Ripley's $K(d)$ 函数 匀栽毛竹林 2009 年活立竹在 0~2.2 m 的尺度下呈聚集分布,在 2.2 m 尺度以上呈随机分布(图 8A)。2010 年林分活立竹从距离尺度 4.0 m 以下的聚集分布过渡到距离尺度 4.0 m 以上的随机分布,在距离尺度为 6.0 m 处有一个波谷尖峰(图 8B)。2011 年在距离尺度为 1.0, 3.5, 6.0 m 处有波谷尖峰,表明活立竹在该尺度下存在团状分布(图 8C)。2012 年活立竹在距离尺度 4.0 m 以上聚集趋势减弱,在距离尺度为 9.0 m 处有 1 个波谷尖峰(图 8D),至 2013 年该波谷尖峰变得明显(图 8E)。丛栽毛竹林 2010 年活立竹在尺度距离 6.0 m 处有明显波谷尖峰(图 8G),2011 年活立竹在 6.0, 9.4 m 距离尺度下有明显尖峰(图 8H),2012 年活立竹在 9.0 m 距离尺度下团状分布现象更加明显(图 8I),至 2013 年活立竹在固定尺度上的尖峰逐渐消失, $\hat{L}(d)$ 估计值曲线波动变小趋于稳定,说明新造毛竹碳汇林地下鞭根系统逐渐完善(图 8J)。图 8C~E 发现匀栽方式的毛竹林在 9.0 m 距离尺度下的尖峰没有丛栽方式那么明显,出现该现象的时间比丛栽方式迟 1 a。随着造林年限的增加,不管是匀栽、丛栽栽植方式下的毛竹林,活立竹在固定尺度下的团状分布会逐渐消失,在 0~2.0 m 尺度下聚集趋势明显,在 2.0~10.0 m 尺度下聚集趋势开始减弱。

3 结论与讨论

本研究在新造毛竹碳汇林设置固定标准地,并对标准地中新竹坐标等连续监测,利用聚集指数和 Ripley's $K(d)$ 函数 2 种方法对 2009–2013 年不同栽植方式下新造毛竹碳汇林成林初期空间分布格局进行研究,得出以下结论:①5 a 造林年限间,匀栽与丛栽毛竹林均呈聚集分布。②新造毛竹碳汇林成林初期,新竹分布格局受母竹栽植方式影响明显。③不同栽植方式下的毛竹碳汇林,活立竹株数与聚集指数之间存在显著相关性。匀栽毛竹林活立竹株数(x)与聚集指数(y)拟合方程为 $y=0.103\ 7x^{0.419\ 3}$, $R^2=0.937\ 9$ 。丛栽毛竹林活立竹株数(x)与聚集指数(y)符合二次方程: $y=0.000\ 04x^2-0.002\ 7x+0.501$, $R^2=0.985\ 6$ 。④新造毛竹碳汇林在成林过程中存在不同距离尺度下的团状聚集分布。⑤栽植方式对新竹与活立竹株数和分布格局影响明显。

本研究发现 2009–2010 年间,匀栽栽植方式下新竹存在小尺度聚集(0~3 m),大尺度(6~10 m)随机分布。范辉华^[23]研究认为:新造竹林造林当年竹鞭扩展范围为 1.934 m。因此,新竹在 6~10 m 距离尺度上呈随机分布是受到了母竹栽植方式的影响。丛栽栽植方式下 2009–2010 年新竹株数增加,而聚集指数 2009–2010 年下降,表明新竹的分布格局也同样受到了母竹栽植方式的影响。

造林后 4 a(2009–2012 年),匀栽与丛栽竹林内新竹与活立竹随着造林年限增加相继在距离尺度为 1.5, 6.1, 9.0 m 处出现团状聚集分布。这种现象与毛竹该物种通过地下鞭繁殖有着密切的关系,新造毛竹林造林 3 a 地下竹鞭最大生长长度可达 6.18 m^[24],正因地下鞭根系统的扩展,部分新竹出笋位置离母竹越来越远,致使毛竹团状分布的距离尺度随着造林年限的增加而增大。造林年限的增加(2012–2013 年)小尺度团状分布($d=1.5$ m)因为地下竹鞭的完善而消失,竹林分布格局趋于稳定。同时还发现,毛竹林各距离尺度下的团状聚集分布在一定程度上可以反映地下竹鞭的生长蔓延情况,为研究毛竹林地下竹鞭的生长蔓延状况提供了一种新的思路。

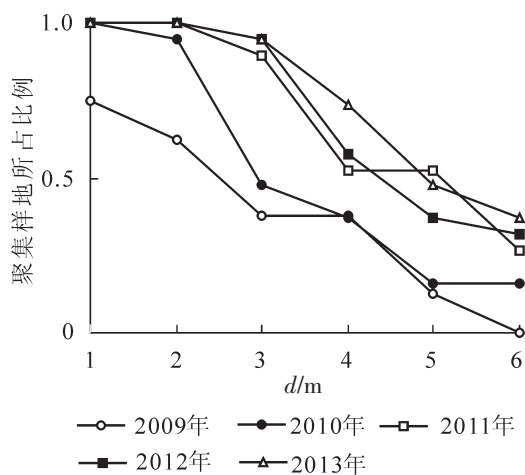


图 5 匀栽毛竹林活立竹各距离尺度聚集标准地所占比例

Figure 5 Proportion of aggregated sample plots of live bamboo in all distance dimension in uniform planting moso bamboo forest

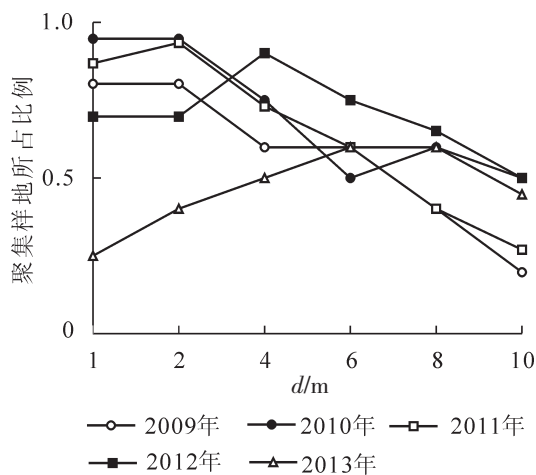


图 6 丛栽毛竹林新竹各距离尺度聚集标准地所占比例

Figure 6 Proportion of aggregated sample plots of new bamboo in all distance dimension in group-planting moso bamboo forest

本研究利用聚集指数对试验数据计算发现,栽植方式对新竹、活立竹株数与聚集指数影响显著。毛竹造林后第 1 年,匀栽与丛栽竹林在新竹株数上无显著差异,可能的原因是母竹移栽时只保留了 30~50 cm 的地下鞭,造林第 1 年母竹主要以竹鞭发育为主,造成第 1 年新竹出土数量较少。从第 2 年开始,丛栽竹林新竹与活立竹株数便显著高于匀栽竹林,新竹的聚集指数也显著高于匀栽竹林。不仅如此,利用 Ripley's $K(d)$ 函数对试验数据的研究发现,匀栽竹林在距离尺度 9.0 m 出现明显波谷尖峰较丛栽方式竹林晚 1 a,截至 2013 年,丛栽竹林新竹与活立竹的 $\hat{L}(d)$ 曲线较之匀栽竹林更为平滑,表明丛栽竹林内各距离尺度下团状分布逐渐减少,林分分布格局相对于匀栽竹林更为稳定。从林业生产角度出发,丛栽栽植方式相对于匀栽方式更利于新竹数量上的扩展,对新造竹林的发育起到了积极的作用,加快了毛竹林成林进程,缩短了成林时间。造成这些现象的原因可能是:匀栽栽植方式母竹行距要小于丛栽栽植方式。丛栽方式母竹 3 株呈品字形为 1 个栽植点,虽然 3 株母竹会产生竞争,但是毛竹为单轴散生型竹种,合理改变栽植时母竹竹鞭和鞭芽的方向,使得 3 株母竹竹鞭在 3 个不同方向上生长,而且栽植点行距较远,在造林初期该方法能使母竹更好地利用周围的空间和土壤养分。

在种群发育过程中,分布格局是随着时间的推移而表现出动态变化的过程^[25]。本研究采用时间尺度与空间尺度相结合的方法,设置不同栽植方式下的毛竹林地,能更好地反映竹林在成林初期空间分布格局的动态变化。竹林碳汇是森林碳汇中一个重要的组成部分,因此,毛竹的造林方式将对碳汇造林起到重要影响,为毛竹林以及碳汇林的营造和经营提供了科学的依据。同时,对毛竹林成林初期以及成林后格局的分析,对森林碳汇计量与监测以及增汇技术的提高提供科学的帮助。由于新造竹林到达成熟稳定阶段一般需要 6~7 a 或者更长的时间^[15],笔者还将继续对现阶段以及成林稳定后的 2 种不同栽植方式下的毛竹林进行监测,完善更长时间尺度的在自然状态下竹林从营造到成林特征变化的研究。

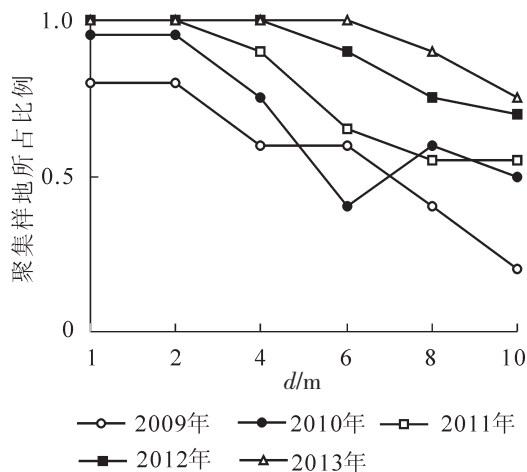
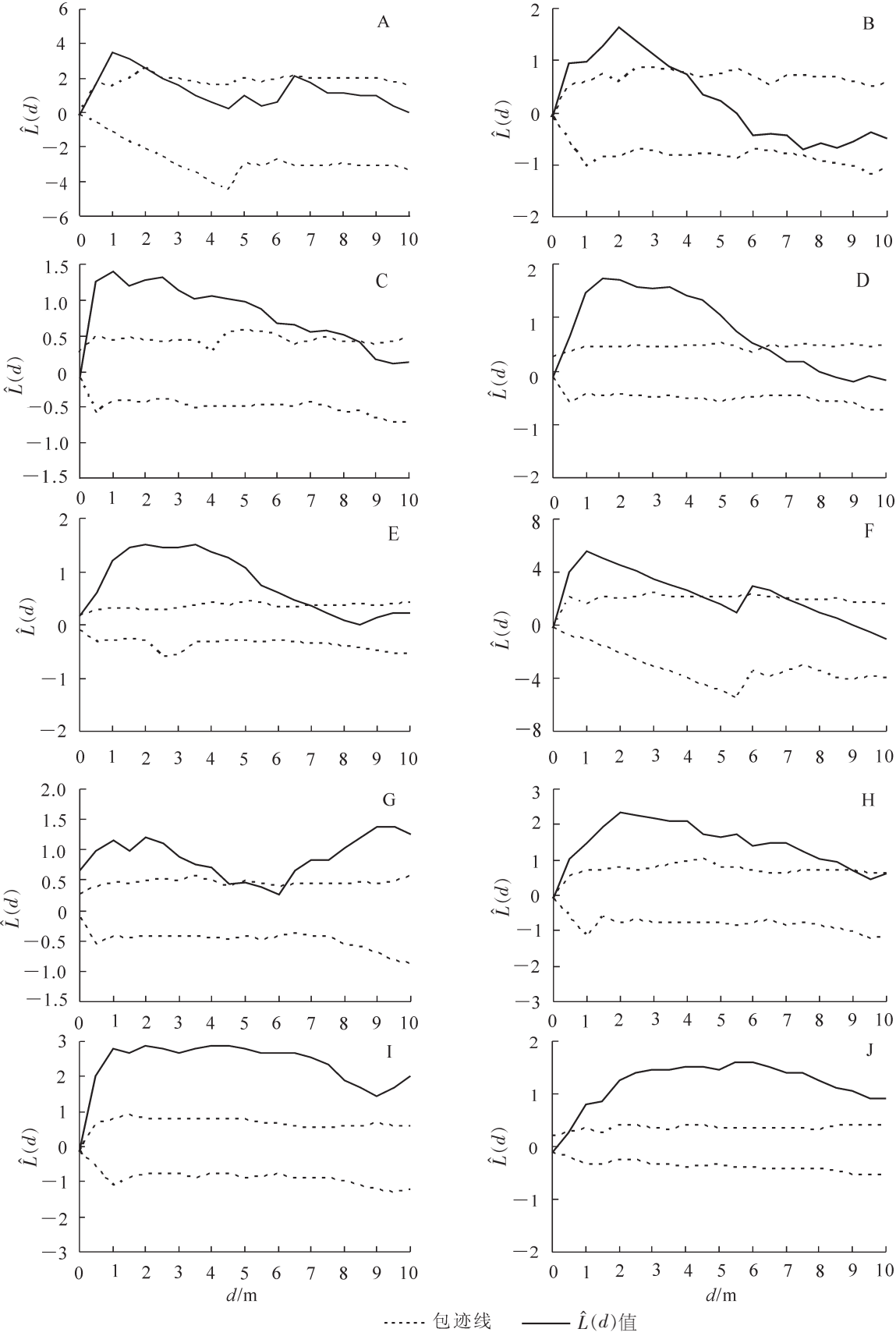


图 7 丛栽毛竹林活立竹各距离尺度聚集标准地所占比例

Figure 7 Proportion of aggregated sample plots of live bamboo in all distance dimension in group-planting moso bamboo forest



A~E. 2009–2013 年匀栽栽植方式；F~J. 2009–2013 年丛栽栽植方式。

图 8 匀栽与丛栽毛竹林各年份活立竹空间分布格局

Figure 8 Different years of stand live bamboo's spatial pattern in uniform planting moso bamboo forest and group-planting moso bamboo forest

4 参考文献

- [1] 何英, 张小全, 刘云仙. 中国森林碳汇交易市场现状与潜力[J]. 林业科学, 2007, **43**(7): 106 – 111.
HE Ying, ZHANG Xiaoquan, LIU Yunxian. Present status and potentiality of forest carbon trade market in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43**(7): 106 – 111.
- [2] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, **47**(7): 7 – 12.
LI Haikui, LEI Yuancai, ZENG Weisheng. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(7): 7 – 12.
- [3] 陈茂铨, 金晓春, 吴林森, 等. 竹林碳汇功能及其影响因子研究进展[J]. 竹子研究汇刊, 2010, **29**(3): 5 – 9.
CHEN Maoquan, JIN Xiaochun, WU Linsen, *et al.* Research progress of carbon sink and its influencing factors of bamboo forest [J]. *J Bamboo Res*, 2010, **29**(3): 5 – 9.
- [4] 史军, 刘纪远, 高志强, 等. 造林对陆地碳汇影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2004, **23**(2): 58 – 67.
SHI Jun, LIU Jiyuan, GAO Zhiqiang, *et al.* Research advances of the influence of afforestation on terrestrial carbon sink [J]. *Prog Geogr*, 2004, **23**(2): 58 – 67.
- [5] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.
CHEN Xiangang, ZHANG Yiping, ZHANG Xiaoquan, *et al.* Carbon stock changes in bamboo stands in China over the last 50 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(11): 5218 – 5227.
- [6] DU Huaqiang, CUI Ruirui, ZHOU Guomo, *et al.* The responses of moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest aboveground biomass to Landsat TM spectral reflectance and NDVI [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(5): 257 – 263.
- [7] ZHOU Guomo, MENG Cifu, JIANG Peikun, *et al.* Review of carbon fixation in bamboo forests in China [J]. *Bot Rev*, 2011, **77**(3): 262 – 270.
- [8] YEN T M, JI Y J, LEE J S. Estimating biomass production and carbon storage for a fast-growing makino bamboo (*Phyllostachys makinoi*) plant based on the diameter distribution model [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **260**(3): 339 – 344.
- [9] YEN T M, LEE J S. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **261**(6): 995 – 1002.
- [10] 时培建, 郭世权, 杨清培, 等. 毛竹的异质性空间点格局分析[J]. 生态学报, 2010, **30**(16): 4401 – 4407.
SHI Peijian, GUO Shiquan, YANG Qingpei, *et al.* Inhomogeneous spatial point pattern analysis of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(16): 4401 – 4407.
- [11] 仇建习, 汤孟平, 沈利芬, 等. 近自然毛竹林空间结构动态变化[J]. 生态学报, 2014, **34**(6): 1444 – 1450.
QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, *et al.* Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(6): 1444 – 1450.
- [12] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 等. 毛竹林空间结构优化调控模型[J]. 林业科学, 2013, **49**(1): 120 – 125.
TANG Mengping, XU Wenbing, CHEN Yonggang, *et al.* Spatial structure optimizing adjustment and control model of *Phyllostachys edulis* stand [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(1): 120 – 125.
- [13] 刘恩斌, 施拥军, 李永夫, 等. 浙江毛竹林分非空间结构特征及其动态变化[J]. 林业科学, 2013, **49**(9): 1 – 7.
LIU Enbing, SHI Yongjun, LI Yongfu, *et al.* Non spatial structural characteristic of moso bamboo forest and its dynamics in Zhejiang Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(9): 1 – 7.
- [14] 汤孟平, 徐文兵, 陈永刚, 等. 天目山近自然毛竹林空间结构与生物量的关系[J]. 林业科学, 2011, **47**(8): 1 – 6.
TANG Mengping, XU Wenbing, CHEN Yonggang, *et al.* Relationship between spatial structure and biomass of a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stand in Tianmu Mountain [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(8): 1 – 6.
- [15] 陈双林, 吴柏林, 吴明, 等. 新造毛竹林分结构年际演替规律及影响因子[J]. 浙江林学院学报, 2004, **21**(4): 393 – 397.
CHEN Shuanglin, WU Bolin, WU Ming, *et al.* A study of the interannual succession rule and influential factors of young stands structures of *Phyllostachys pubescens* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2004, **21**(4): 393 – 397.
- [16] 陈婷, 施拥军, 周国模, 等. 毛竹碳汇林营造初期林分非空间结构年际变化特征[J]. 浙江农林大学学报, 2015,

32(2): 181 – 187.

CHEN Ting, SHI Yongjun, ZHOU Guomo, *et al.* Interannual variation characteristics for stand structures in the early stages of new moso bamboo carbon sink stands [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, 32(2): 181 – 187.

- [17] 惠刚盈, 胡艳波, 徐海. 森林空间结构的量化分析方法[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(增刊): 45 – 48.
HUI Gangying, HU Yanbo, XU Hai. Quantitative analysis of forest spatial structure [J]. *J Northeast For Univ*, 2005, 33(supp): 44 – 48, 60.
- [18] DONNELLY K P, HOLDNER I. *Simulations to Determine the Variance and Edge Effect of Total Nearest-neighbour Distance* [M]. London: Cambridge University Press: 1978: 91 – 95.
- [19] 汤孟平. 森林空间结构分析[M]. 北京: 科学出版社, 2013..
- [20] BESAG J L, DIGGLE P J. Simple Monte Carlo tests for spatial pattern [J]. *Appl Stat*, 1977, 26(3): 327 – 333.
- [21] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 等. 天目山常绿阔叶林优势种群及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2006, 30(5): 743 – 752.
TANG Mengping, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, *et al.* Study of dominant plant populations and their spatial patterns in evergreen broadleaved forest in Tianmu mountain [J]. *J Plant Ecol*, 2006, 30(5): 743 – 752.
- [22] 邓英英, 汤孟平, 徐文兵, 等. 天目山近自然毛竹纯林空间分布格局研究[J]. 竹子研究汇刊, 2011, 30(1): 11 – 15.
DENG Yingying, TANG Mengping, XU Wenbing, *et al.* A study on spatial patterns of nature-approaching moso bamboo pure forest in Tianmu Mountain [J]. *J Bamboo Res*, 2011, 30(1): 11 – 15.
- [23] 范辉华. 新造毛竹林竹鞭生长规律的研究[J]. 福建林学院学报, 1999, 19(1): 30 – 32.
FAN Huihua. Study on rhizome growth regularity of new-planted *Phyllostachys edulis* [J]. *J Fujian Coll For*, 1999, 19(1): 30 – 32.
- [24] 邱尔发, 陈存及, 范辉华, 等. 毛竹种源竹鞭生长进程研究[J]. 江西农业大学学报, 2002, 24(2): 245 – 250.
QIU Erfa, CHEN Cunji, FAN Huihua, *et al.* A study on the rhizome growth process of provenances of *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2002, 24(2): 245 – 250.
- [25] 操国兴, 钟章成, 刘芸, 等. 缙云山川鄂连蕊茶种群空间分布格局研究[J]. 生物学杂志, 2003, 20(1): 10 – 12.
CAO Guoxing, ZHONG Zhangcheng, LIU Yun, *et al.* The study of distribution pattern of *Camellia rosthorniana* population in Jinyun mountain [J]. *J Biol*, 2003, 20(1): 10 – 12.